

NÉHÁNY OPTIKAI KISÉRLET HÉLIUM - NEON GÁZLÉZERREL A KÖZÉPISKOLÁBAN

Dr. Papp Katalin

1917-ben Albert Einstein kidolgozta a sugárzás klasszikus kvantumelméletét, és ebben leírta a kényszerített emisszió folyamatát. A jelenség lényege abban áll, hogy az atomi rendszerekben nemcsak spontán módon, hanem külső sugárzás hatására is létrejöhet a magasabb energiaszintről egy alacsonyabb energiaszintre való átmenet. Ezen indukált emisszió jelenségén alapul a lézerek működése. A gyakorlati megvalósításra mintegy negyven évet kellett várni, amíg Maiman 1960-ban az első - a látható színek tartományban működő - rubinlézert elkészítette. Ezzel új tudományág jött létre, a kvantumelektronika, és rohamosan terjedt az új fényforrás felhasználása. A következőkben a lézerek fizikatanításban történő felhasználását mutatjuk meg néhány demonstrációs kísérlettel, nem törekedve a teljességre.

A lézerek működéséről

Egyensúlyi állapotban - a termodinamika törvényei szerint - az egyes energiaszinteken az atomok eloszlását a Boltzmann-féle függvény határozza meg. Az atomokban az optikai átmenetek alacsonyabb energiaállapota mindig jobban betöltött, mint a hozzá legközelebbi első magasabb energiájú állapot, ami azt jelenti, hogy szobahőmérsékleten gyakorlatilag minden atom alapállapotban van. Ez a természetes betöltöttség vagy populáció. A sugárzás erősítése indukált emisszióval csak a fentivel ellentétes, ún. inverz betöltöttség

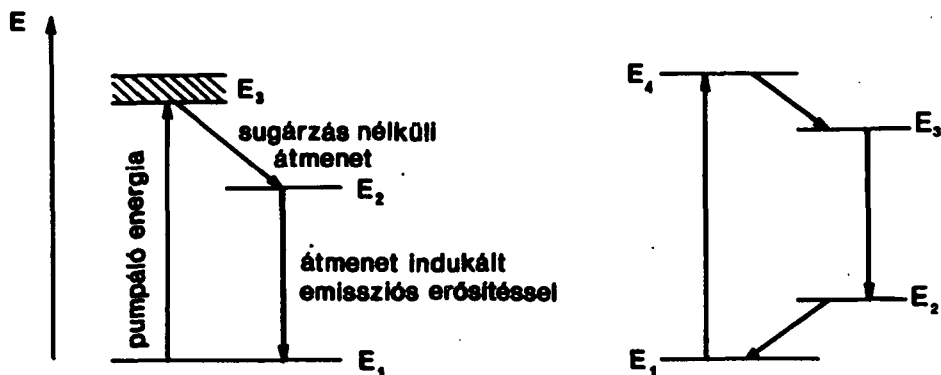
vagy populáció. A sugárzás erősítése indukált emisszióval csak a fentivel ellentétes, un. inverz betöltöttség esetében lehetséges. Inverzió akkor van, ha egy magasabb energiaszint jobban betöltött, mint egy alacsonyabb.

A lézer: (angol helyesírással laser) a Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation kifejezés kezdőbetűiből alkotott betűszó, jelentése fényerősítés indukált sugárzással.

Egy lézeranyagnak legalább három energianívóval kell rendelkeznie. Az ilyen anyagok közül azok a legalkalmasabbak, amelyeknek a felső (hármás) energiaszintje szélessávú, mert ebben az esetben a pumpáló fény spektrumának szélesebb tartományában jön létre az abszorpció. Így a pumpáló fény abszorpciója az elektronokat a hármás nivóra emeli, ahonnan nagyon gyorsan a kettes szintre esnek le. Az energiakülönbség a kristályrács energiáját növeli. Ha a kettes energiaszint élettartama elég hosszú (pl. 3 ms) - egy metastabil állapotról van szó -, és ha elég erősen pumpáljuk az anyagot, akkor elérhetjük a kettes szint inverz populációját az egyeshez viszonyítva. Mivel az egyes szint az alapállapot, ezért az ilyen három szintes lézereknél az aktív atomok több mint a felét kell gerjeszteni, ez nagyon nagy pumpáló teljesítményt követel. Éppen ezért a gyakorlatban csak egy ilyen típusú lézer terjedt el, nevezetesen a rubin-lézer.

Az összes többi szilárdtest-lézer anyagok négyszintes rendszerűek. Ezeknél a lézerátmenet a kettes szintre történik, amely állapotnak az élettartama általában nagyon kicsiny (pl. 10^{-7} s). A kettes szintről az egyesre való átmenet sugárzás nélkül valósul meg. Az üzemi hőmérsékletet célszerűen úgy választják meg, hogy a kettes szint a Boltzmann-eloszlásnak megfelelően gyakorlatilag teljesen üres legyen. Ennek következtében a hármás szint bármilyen populációja már inverziót jelent. A legfontosabb négy szintes anyagok valamilyen ritka földfémekkel, pl. neodiniummal szennyezett kristályok. Ahhoz, hogy inverz populáció létrejöjjön, a rendszerbe különlegesen nagy energiát kell juttatnunk.

Az 1. ábrán egy három (1/a), illetve egy négyszintes rendszer (1/b) energiasémáját mutatjuk be, amelyekkel az inverzió létrehozása értelmezhető.

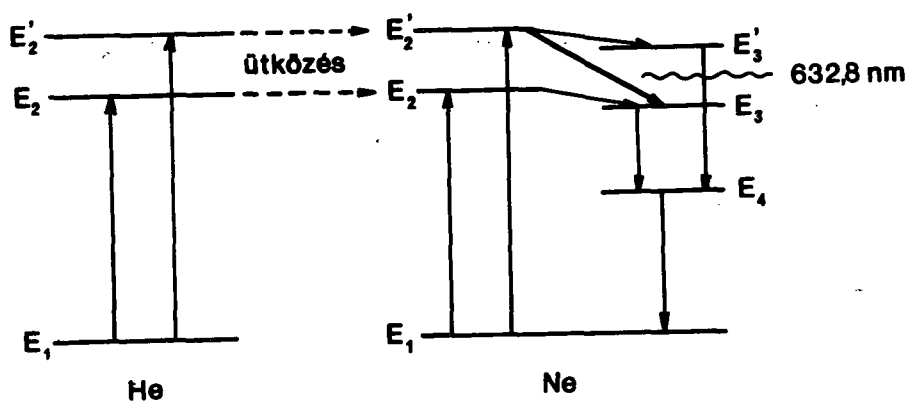


1. ábra

A populáció inverzió állapotában levő közeget két, a sugárzást visszaverő tükrökből álló, ún. optikai rezonátorba helyezük. A haladó hullám, miután elhagyja a lézerek közegét, újra visszaverődik, s ez pozitív visszacsatolást eredményez, így önfenntartó rezgési állapot, vagyis lézeroszcilláció alakul ki. A fényerősítés jelensége abban áll, hogy az invertált közegben haladó fényhullám azokat a gerjesztett molekulákat, amelyekkel találkozik, sugárzásra kényszeríti. Ennek következtében a fény intenzitása továbbhaladása közben növekedni fog. Az indukált emissziós folyamat igen lényeges tulajdonsága, hogy az indukált sugárzás a kényszerítő fényvel azonos terjedési irányu, frekvenciájú, fázisu és polarizációs állapotú.

Populáció inverziót atomi vagy ionokból álló rendszerekben, molekulákban, félvezető strukturákban, szilárd testek kollektív gerjesztésével lehet létrehozni. A lézereket különböző szempontok, például az aktív anyaguk, a pumpálás mód-

ja, teljesítményük, frekvenciatartományuk, impulzushosszuk alapján csoportosíthatjuk. Az aktív anyag halmazállapota szerinti csoportosításban gáz-, folyadék- és szilárdtest - lézereket különböztetnek meg. A gázokban, így az optikai kísérletekhez használt He-Ne gázlézernél is, leggyakoribb az elektromos gázkisüléssel létrehozott inverziós állapot. A He-Ne lézerben 85 % hélium és 15 % neongáz keveréke van néhány torr nyomáson. Az energiaszinteket a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra

A rendszerben a neon szerepel aktív anyagként (e gáznak van a lézerműködésre alkalmas átmenete), a héliumra az inverzió megvalósításához van szükség. A héliumot elektromos gázkisüléssel gerjesztik. A nagy számban jelenlévő héliumatomok egy része ionizálódik, és a neon atomokkal ütközve ezeknek adják át energiájukat. Az így gerjesztett neon atomok sugárzással jutnak az alapállapotba.

A lézereket különleges paramétereik teszik alkalmassá arra, hogy a hagyományos fényforrások helyett - például az optikai demonstrációs kísérleteknél - főszerephez jussanak.

Az alapvető lézer-jellemzők - csak felsorolás szintjén - a következők:

1. A lézersugárzás *monokromatikus* (egy-hullámhosszu), ez széles körű felhasználást, új tudományos jelenségek kutatását teszi lehetővé, de az optikai kísérletek bemutatásánál is hasznos tulajdonság.

2. A lézersugárzás *kis divergenciája* (széttartása) az alkalmazások jelentős részénél szerepet játszik, de különösen az iránykitűzésnél, távolságmérésnél, valamint az optikai kísérleteknél hasznosítható.

3. A sugárzás *nagy intenzitásu*. A szokásos fényforrások intenzitását meghaladó nagyságrendje miatt, kis területen óriási energia-, illetve teljesítménysűrűség érhető el (10^{14} - 10^{16} W/cm²). Ez tette lehetővé, hogy az ipari felhasználás mellett, új tudományos kutatási terület fejlődhetett ki, a nemlineáris optika.

4. A lézerfény *koherens* (nagy uthosszkülönbség esetén is interferenciaképes), ellentétben a szokásos fényforrásokkal (pl. izzólámpák, spektrállámpák, Nap). Koherencia-hossza vákuumban több métert is elérhet. Ez a tulajdonság valamennyi felhasználási területen fontos.

A tudományos kutatás, az ipari alkalmazás (például új jelenségek kutatása, orvosi-biológiai alkalmazás, anyagszerkezeti vizsgálatok, ipari anyagmegmunkálás, nagy pontosságú távolságmérés stb.) mellett az új fényforrások megjelentek a művészetben, gyakran zenei-koncertek kísérői is. A fent leírt tulajdonságok miatt indokolt, hogy rövid időn belül sor kerüljön az optikai kísérleteknél történő felhasználásra az *iskolai fizikatanításban* is. Erre különösen alkalmas a *He-Ne gázlézer*, amely az elektronika rohamos fejlődésével kis méretben, hálózatról üzemeltetve, a középiskolák számára is beszerezhető kísérleti eszköz.

A He-Ne lézer fő jellemzői:

- folyamatos üzemmód,
- hullámhossza 632,8 nm (mélyvörös),
- koherens,
- divergencia $\sim 10^{-3}$ rad,
- legtöbbszor síkban poláros,
- nyalábátmérő $\sim 1-2$ mm,
- teljesítmény ~ 1 mW,
- hazai (MOM) gyártmány, ára ~ 13 ezer Ft.

A hélium-neon gázlézer fenti paraméterei (intenzitás, kis divergencia, koherencia) miatt, az optikai kísérleteknél a különböző optikai elemek beállítása egyszerű, a kísérletek fényerősek. A kvantitatív mérések pontossága, a bemutatandó jelenségek láthatósága jelentősen megnövekedett. A sugárzás frekvenciája miatt a kísérletek esztétikusak, észlelésük kellemes.

*Geometriai és fizikai optikai
kísérletek lézerrel*

A lézer, mint említettük, kicsiny keresztmetszetű fénysugarat bocsát ki, amely a sugárzás útjába helyezett, ún. nyalábbővítővel kiszélesíthető. Nyalábbővítésre általában lencserendszert alkalmazunk, amely pl. egy 5 cm fókusztávolságú szóró, és egy 10 cm fókusztávolságú gyűjtőlencséből áll. A célnak jól megfelel a lézerfény útjába helyezett üvegbot is. A geometriai optikai kísérleteknél általában több párhuzamos sugárra van szükség. Ennek megvalósításához ún. fényszótót használunk, amely lényegében megfelelő szögben beállított, különböző reflexiójú üveglemezekből áll. Erre a célra kiválóan alkalmas a napszemüvegeknél használt félig-áteresztő tükrök. A fényszótó segítségével létrehozott sugármeneteket példaként a 3. ábrán mutatjuk be, lencsék vizsgálatára szolgáló kísérlettel. (Lásd a tanulmány végén!) Ezzel az eszközzel bármely geometriai optikai kísérlet elvégezhető, az elemek megfelelő cseréjével.

A fizikai optikai kísérletek is könnyebben, kényelmesebben végezhetők el gázlézerrel, mint a konvencionális fényforrásokkal. Nagyon tanulságos a hagyományos elhajlási jelenségek, interferenciaképek gázlézerrel történő bemutatása.

A következőkben ezen kísérletek helyett a középiskolai oktatás számára könnyen hozzáférhető lykopódiumporos (gyógynövény szaküzletben kapható) dialemezen és madártollon (sikrács) létrejött elhajlási képet mutatjuk be a 4. a és b ábrán. A lykopódiumporos dialemeznél a közel azonos átmérőjű (kb. 30 μm), nagyszámu pollenszemeken kapott elhajlási kép ugyanolyan, mintha azt egyetlen környílás idézte volna elő.

A törésmutató változásával kapcsolatos kísérletek

A törésmutató - az optikai közegeknél - a jelenlegi középiskolai tananyagban, mint a Snellius - Descartes törvényben bevezetett állandó szerepel, amely függ a közegtől és a hőmérséklettől. A következő kísérletekkel a törésmutató fogalmának elmélyítéséhez járulhatunk hozzá.

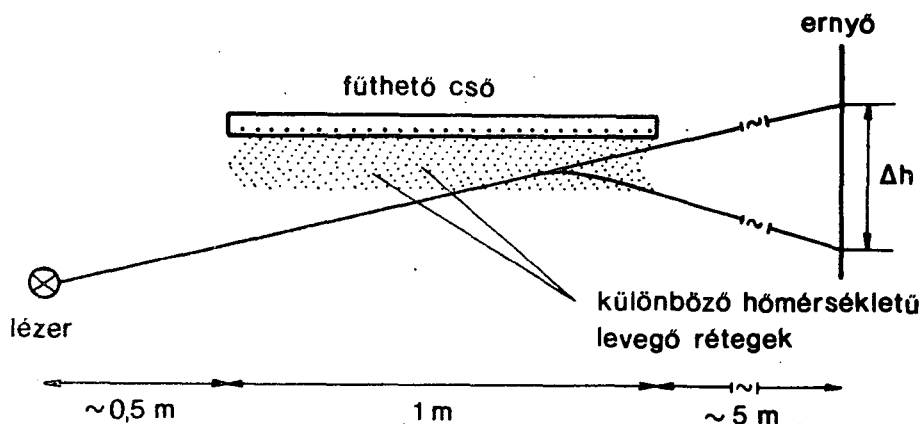
a) A törésmutató változása a hőmérséklettel

A hőmérséklet-változásra bekövetkező törésmutató változás lényegében a délibáb-jelenség alapja. Az alábbi kísérlet, amely a természet egy nehezen megfigyelhető jelenségét hozza tanuló-közelbe, a "tűnemény" elvét a tanteremben mutatja be.

Ha előállítunk két olyan levegőréteget, amelyek határfelületén a hőmérsékletgradiens elég nagy, akkor a két réteg határfelületén - surlódó megvilágítást alkalmazva - a teljes visszaverődés jelensége lép fel.

A kísérlet összeállítását az 5. ábrán mutatjuk be. Az ábrán az eltérő hőmérsékletű levegőrétegeket különböző vonalkázás jelzi. Az ábra nem méretarányos, a lézert a csőből kb. 0,5 m-re helyeztük el, az ernyő pedig kb. 5 m távolság-

ban volt a fűtött csőtől. Az általunk összeállított berendezéssel $\Delta h \sim 5$ cm adódott. (Ezt úgy mértük, hogy hideg cső esetén megmértük az ernyőn kapott fényfolt és a teljes visszaverődés utáni fényfolt távolságát.)



5. ábra

A kísérlet természetesen hagyományos fényforrással is elvégezhető, de gázlézert alkalmazva, egyrészt nincs szükség a fénynyalábot szűkítő optikai elemekre, másrészt maga a sugármenet a levegőben levő poron (krétaporon) való szóródás miatt nyomon követhető. A teljes visszaverődés a két réteg határfelületén jól látható.

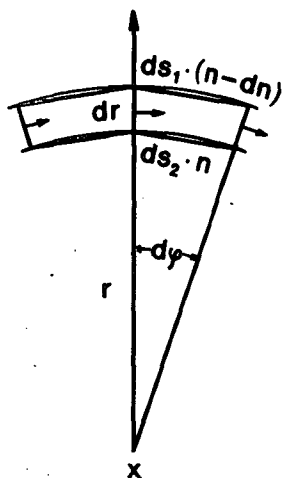
A magas hőmérsékletű levegő előállítására rézből készült, belül kerámiába ágyazott fűtőszállal ellátott csövet használtunk. A csövet a kedvezőbb hőmérsékletviszonyok miatt hosszirányban kb. feleátmérőjénél kettévágtuk. Az így kialakított félhenger profilu fűtött cső alkalmas volt arra, hogy kb. 1 kW teljesítményével a sík felület alatt, magas, egyenletes hőmérsékletű levegőréteget állítson elő. A határfelület, amelyen a teljes visszaverődés létrejött, a cső alatt kb. 1 cm távolságban alakult ki, itt volt a legnagyobb a hőmérséklet-gradiens.

b) Törésmutató gradiens kialakulása
oldatok közötti diffúziónál

A törésmutatónak és a közegben levő molekulakoncentráció kapcsolatára vonatkozik az un. diszperziós formula [5]:

$$\frac{n^2 + 1}{n^2 + 2} = \frac{1}{12\pi^2 \epsilon_0} \frac{e^2}{m} N_v \frac{1}{v_o^2 - v^2},$$

ahol n a közeg törésmutatója, ϵ_0 a vákuum dielektromos állandója, e és m az elektron töltése és tömege, v_o a vizsgált rendszer tulajdonságaiból megadható, un. sajátfrekvencia, v az alkalmazott fény frekvenciája, N_v az egységni térfogatban levő molekulák száma. Mivel a törésmutató a molekulakoncentrációtól a fenti összefüggés szerint függ, a közegben törésmutató-gradiens alakul ki akkor, ha egy adott térrész tartományban a molekulák koncentrációjának folyamatos változását hozzuk létre. Ilyen közegben a fénysugár utja "görbült vonalként" észlelhető (6. ábra).



7. ábra

Általános esetben a "görbült" fénysugár görbületi sugarát a 7. ábra alapján számíthatjuk ki. A görbületi sugár meghatározásához felhasználjuk a Snellius - Descartes törvényt és a Fermat-elvet ($s_1 \cdot n_1 = s_2 \cdot n_2$). A 7. ábráról az optikai uthozsokra vonatkozó összefüggés:

$$ds_1 (n - dn) = ds_2 n.$$

Az ábra geometriájából következik:

$$ds_1 = d\phi (r + dr) \text{ és } ds_2 = d\phi \cdot r.$$

A három egyenletből kapjuk meg a görbületi sugár és a törésmutató gradiens kapcsolatát: $r = \frac{n}{dn/dr}$. Az x pontban a törésmutató gradiens értéke a fénysugárra merőleges irányban dn/dr .

A molekulák koncentrációjának folyamatos változása egymás fölé rétegezett oldatok diffúziójával valósítható meg. Különböző kémiai összetételű oldatok rétegzésekor kezdetben élesek a határfelületek. Ezek a határfelületek diffúzió következtében lassan eltűnnek, és folytonos törésmutató-gradiens alakul ki.

A kísérletet két különböző oldatsorozattal végeztük el. Egy üvegcsőbe szénkéneg ($n = 1,63$) és benzol ($n = 1,50$) 1 cm-es rétegeiből váltakozva tízet rétegeztünk egymás fölé. A fénysugár legnagyobb "görbülése" a fényt végén, a közeg felső részén következett be, ahol a görbületi sugár a fenti egyenletnek megfelelően a legkisebb. A törésmutató-gradiens a fénysugárra merőleges irányban a legnagyobb értékű (8. ábra).

Egy másik közegben "görbülő" lézersugár útját a 9. ábrán szemléltetjük. Ebben a közegben telített timsóoldat felett glicerín és alkohol 1:1 arányú keveréke, majd legfelül 10 %-os vizes alkohol helyezkedik el. A rétegek diffúziója után itt is kialakul a törésmutató-gradiens, amely előjelet vált, így "sajátos alakú" sugárnyalábot figyelhetünk meg. (Megjegyezzük, hogy a törésmutató-gradiens nemcsak radiális, hanem hengeres, ill. szferikus szimmetriát is mutathat. A jelenség jelentős szerepet játszik az élőlények szemének működésében.)

A lézer a "XX. század fénye". Felhasználási területei egyre tágulnak, alkalmazása az oktatásban, a fizikatanításban nem utópia. A leírt kísérletekkel azt kívántuk bemutatni, hogy a lézerfény alkalmazása a középiskolai fizikatanításban a "hagyományos" optikai kísérletek mellett, további érdekes kísérletek elvégzését teszi lehetővé. A dolgozatban ezek közül csak néhányat emeltünk ki. Megjegyezzük, hogy a lézerfény felhasználása nemcsak az optika témakörre korláto-

zódik, hasznos segítőeszköz lehet pl. a mechanikában is. Az új középiskolai tanterv korszerű kísérleti eszközöket igényel, ennek az elvárásnak jól megfelel a gázlézer, amely ma már nem hiányozhat a középiskolák szertárából.

IRODALOM

- [1] BUDÓ-MÁTRAI: Kísérleti Fizika III., Tankönyvkiadó, Budapest, 1980.
- [2] KETSKEMÉTY I. - KOZMA L.: Festéklézerek. Egyetemi jegyzet, Szeged, 1978.
- [3] KROÓ Norbert: Kutatás és gyakorlat a lézerek fényében, Fizikai Szemle, 1979/3.
- [4] H. MACHEMER: Der Laser als Lichtquelle für die Experimente in der geometrischen Optika, Praxis der Naturwissenschaften Physik, 26. 1977/1.
- [5] R.V. POHL: Optika i atomnaja fizika, "Nauka" Moszkva, 1966.
- [6] SÜKÖSD Csaba: A lézer alapjairól - egyszerűen, Fizikai Szemle, 1977/10.
- [7] K. TRADOWSKY: A laser ABC-je, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1971.

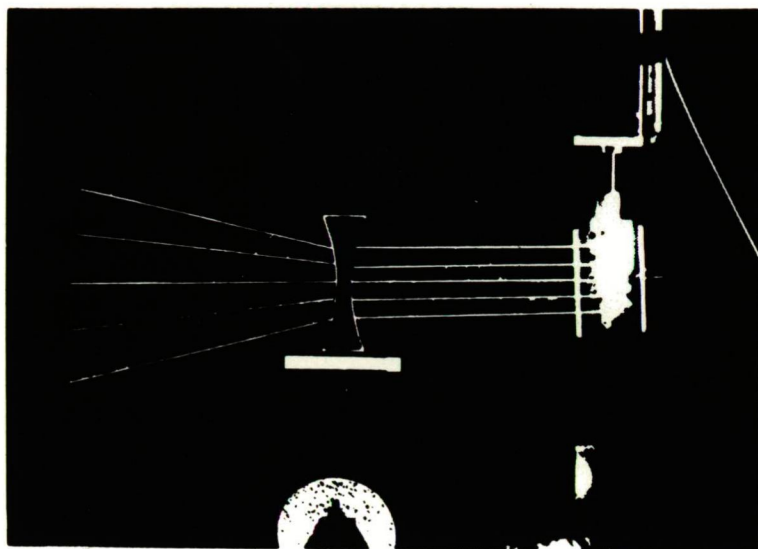
SOME EXPERIMENTS WITH A HELIUM-NEON GAS LASER
IN SECONDARY SCHOOLS

by
Katalin Papp

Summary

With the discovery of lasers and the development of the related techniques, an "ideal" light source became available for those performing optical experiments. The favourable properties of laser light allow its use in physics teaching in secondary schools.

A brief outline is given of the principles of operation of lasers, with special regard to the He-Ne gas laser employed in teaching. As an example of a geometrical optical experiment, without a striving for completeness, a description is given of a beam splitter. Instead of the traditional physical optical experiments, the presentation of the diffraction pattern occurring on a lycopodium powder glass slide and on a bird's feather is worthy of note because of its simplicity. A more detailed account is given of experiments connected with the change of the refractive index. These experiments, which are related to the basic teaching material in the looser sense, are very spectacular and help towards a broader understanding of the concept of refractivity. The temperature-dependence of the refractive index (mirage phenomenon) is first described. In this respect a special experimental apparatus can be set up, with the aid of which the full reflection at the interface of air layers at different temperatures can be demonstrated well. The refractive index variation originating from the diffusion of solutions results in the "curvature" of laser light. Besides a brief theoretical interpretation of the phenomenon, information is also provided on the practical realization of the experiment.



3. ábra

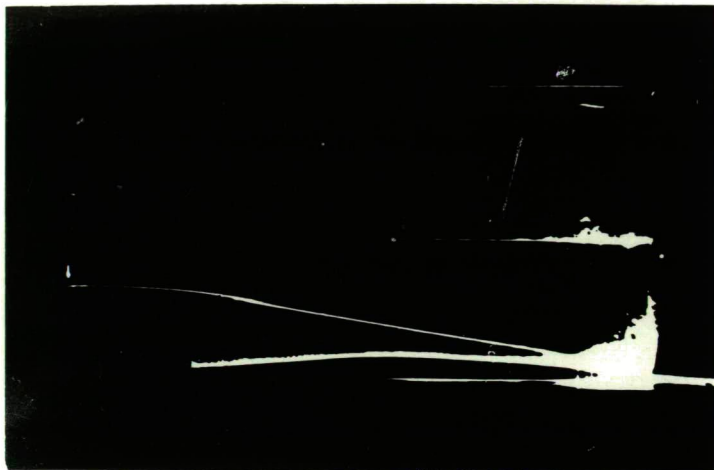


4/a. ábra

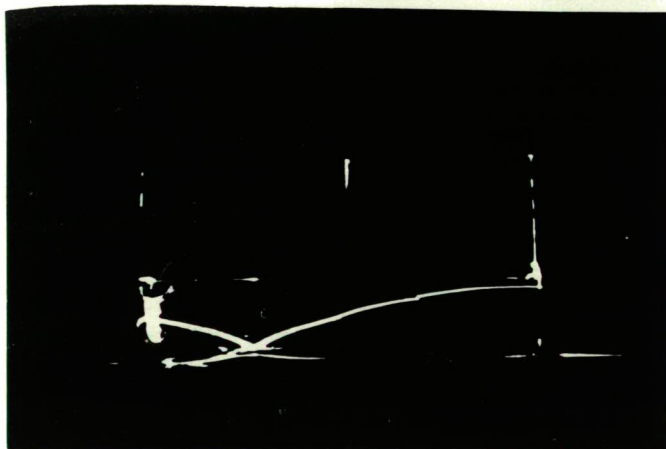
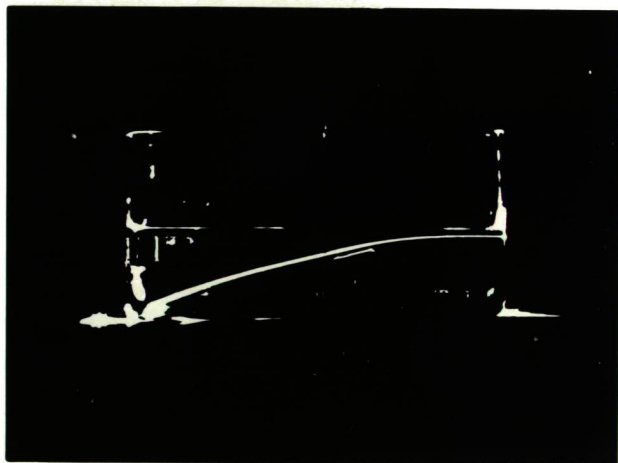


4/b. ábra

6. ábra



8. ábra



9. ábra